

# ERRORES PRODUCIDOS POR TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA BASADOS EN TERMISTORES NTC

DANIEL SLOMOVITZ, SENIOR MEMBER, IEEE

JOSE JOSKOWICZ, STUDENT MEMBER, IEEE

UTE -LABORATORIO  
Paraguay 2385, Montevideo, Uruguay

FACULTAD DE CIENCIAS, Instituto de Física  
Tristán Narvaja 1674, Montevideo, Uruguay

Resumen: Se muestra que mediante el uso de apropiados modelos matemáticos se logran errores, en la medición de la temperatura, sustancialmente menores a los propuestos en recientes trabajos. Se concluye que el modelo exponencial usado por todos los autores hasta el presente, no es apto en circuitos linealizadores activos. Se propone el uso de modelos de 3 parámetros.

Becker et al [2] propusieron agregar, al modelo exponencial, un factor potencial.

$$R(T) = A_3 T^n \exp(B_3/T) \quad (3)$$

Otra fórmula empírica fue propuesta por Steinhart y Hart (SH) [1].

$$R(T) = \exp\left\{\frac{1}{3}\left[(-F_1+F_2) - \frac{1}{3}\right] - \frac{1}{3}\right\} \quad (4)$$

donde

$$F_1 = \frac{(27/2)(A_4 - 1/T)}{C_4}$$

$$F_2 = (3/2) \sqrt{3} \left\{ 27 \left[ \frac{(A_4 - 1/T)^2}{C_4} + 4 \left( \frac{B_4}{C_4} \right)^3 \right] \right\}$$

## 1. INTRODUCCION

Los termistores NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) son comúnmente usados como transductores de temperatura. Son componentes robustos y poseen grandes coeficientes de variación de su resistencia con la temperatura. Sin embargo presentan problemas en el uso, debido a que la relación entre su resistencia R y la temperatura absoluta T no es lineal, sino del tipo exponencial. La ecuación (1) muestra la aproximación matemática más simple de esa dependencia.

$$R(T) = A_1 \exp(B_1/T) \quad (1)$$

Donde A<sub>1</sub> y B<sub>1</sub> son parámetros que dependen del material y la forma de cada termistor. Esta ecuación representa al modelo exponencial y es la aproximación más usada. Sin embargo cuando se la utiliza en amplios rangos de temperatura conduce a grandes errores. Varios autores han propuesto mejores modelos [1-4].

Por otro lado, muchos trabajos tratan sobre circuitos electrónicos que obtienen una señal de salida lineal con la temperatura. Sengupta [5] propone un circuito generador de pulsos que logra errores de 10°C en un rango de 50°C a 85°C. Otros autores proponen circuitos con errores aun mayores [6, 7]. Sundquist [8] propone un circuito conversor temperatura-frecuencia que teóricamente compensa exactamente la no linealidad mostrada en (1). Sin embargo en su corroboración experimental aparecen errores importantes.

Todos los autores mencionados usan la relación (1) como modelo del termistor. En este trabajo se muestra que dicha ecuación no debe ser usada cuando se pretende lograr bajos errores en grandes rangos de temperatura, siendo necesario el uso de mejores modelos matemáticos. En particular proponemos usar el modelo propuesto Bosson et al [3], que si bien no es el mejor, es muy simple desde el punto de vista matemático.

A modo de ejemplo, analizaremos detalladamente en la sección 4 el circuito linealizador propuesto por Sundqvist, mostrando que es posible lograr errores 20 veces menores que los que él logra, simplemente cambiando el modelo matemático del termistor por uno más exacto.

## 2. EVALUACION DE MODELOS DE TERMISTORES

Muchos modelos matemáticos sobre la relación resistencia-temperatura han sido propuestos.

Bosson, Gutmann y Simmons (BGS) han propuesto un modelo empírico de la forma:

$$R(T) = A_2 \exp\left\{\frac{B_2}{T+\theta}\right\} \quad (2)$$

Cordella [4] propuso el siguiente modelo heurístico:

$$R(T) = R_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{A_5 \exp(B_5 T/T_0)} \quad (5)$$

Esta aproximación puede obtenerse usando el desarrollo de polinomios de Lagrange en la ecuación (1), o sea desarrollando la función real  $\ln R = f(1/T)$  como un polinomio de segundo grado.

$$R(T) = \exp\{A_6(1/T) + B_6(1/T)^2 + C_6\} \quad (6)$$

Todos los modelos incluyen parámetros que deben determinarse. El modelo exponencial posee dos parámetros (A<sub>1</sub> y B<sub>1</sub>). Estos deben calcularse para lograr el mejor ajuste entre el comportamiento del modelo y el real. Todos los modelos restantes poseen tres parámetros. Esto posibilita ajustes mejores. En la referencia [9] se muestra que existen grandes diferencias entre los errores producidos por el modelo exponencial y los modelos de tres parámetros. Sin embargo todos los modelos de tres parámetros poseen errores similares entre sí.

El modelo propuesto por SH es el más conocido, mientras que el modelo propuesto por BGS ha sido olvidado. En gran medida esto se debe a que en el artículo de SH se comparan estos dos modelos contra el comportamiento real de varios termistores. SH concluyen que su modelo tiene errores 25 veces menores que el de BGS. Desafortunadamente (para BGS) dicha comparación fue errónea, pues se comparó una función de la forma T(R) contra otra R(T), sin tener en cuenta que por ser funciones inversas, no pueden compararse directamente. En el trabajo [9] se comparan los errores producidos por los 6 modelos descritos anteriormente, contra el comportamiento real de 13 termistores diferentes. Se concluye que el modelo SH tiene errores 2 veces menores que el BGS cuando el rango de temperatura es grande (-60°C a 150°C). En rangos limitados (-10°C a 100°C) los errores son similares.

La ventaja del modelo BGS reside en que matemáticamente es mucho más simple que el SH por lo cual es más fácil de usar con circuitos linealizadores

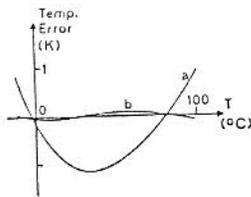


Figura 1

Error en temperatura de modelos de termistores.

a: modelo exponencial  
b: modelo BGS

analógicos.

Las curvas de la Fig. 1 muestran la relación entre el error absoluto en temperatura contra la temperatura, para el modelo exponencial (curva a) y el modelo BGS (curva b). Se usaron datos proporcionados por un fabricante de un termistor particular, sin embargo estas curvas son similares para los 13 termistores mencionados anteriormente. La aproximación exponencial presenta errores entre 10 y 20 veces mayores que la BGS.

El uso del modelo BGS, de 3 parámetros, en un análisis teórico incrementa la complejidad del mismo sin embargo, los 3 parámetros no son totalmente independientes. Calculados para los 13 termistores mencionados se observa una correlación entre B2 y  $\theta$ . Los círculos de la Fig. 2 muestran los valores obtenidos. La mejor recta que relaciona estos parámetros es

$$\theta = 0.0179 B2 - 42.7 \quad (7)$$

donde  $\theta$  y B2 están expresados en K. La desviación standard es de 12%. Esto limita prácticamente a dos, el número de variables independientes, por lo cual los estudios que usen este modelo no serán más complejos que los que usen el modelo exponencial.

El parámetro B1 del modelo exponencial está relacionado con el parámetro B2 del modelo BGS. La Fig. 3 muestra que al aumentar B1 aumenta B2, siguiendo una relación aproximadamente lineal. Los puntos de esta figura fueron calculados a partir de los datos de los 13 termistores mencionados. La mejor recta que relaciona estos puntos es

$$B2 = 2.332 B1 - 3268 \quad (8)$$

De esta forma, mediante las ecuaciones (7) y (8) es posible estimar los valores B2 y  $\theta$ , a partir del valor B1. Esto se usará en la sección 3.

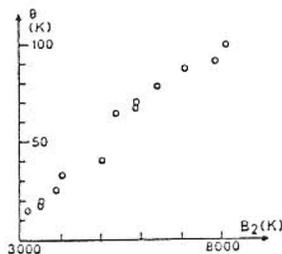


Figura 2

Relación entre los parámetros  $\theta$  y B2 del modelo BGS.

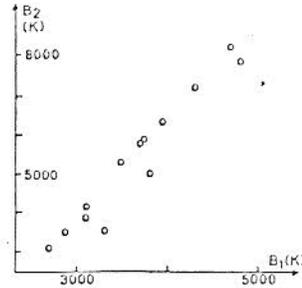


Figura 3

Relación entre el parámetro B2 del modelo BGS y el parámetro B1 del modelo exponencial.

### 3. CIRCUITO LINEALIZADOR RESISTIVO

Hoge [10] ha mostrado que todos los circuitos linealizadores basados en resistores (circuitos serie, paralelo, puentes, etc) tienen la misma capacidad de linealizar la característica no lineal de los termistores. El circuito linealizador más simple se muestra en la Fig. 4, donde U es un voltaje constante,  $V_o$  el voltaje de salida,  $R_t$  es el termistor y R un resistor. Usando el modelo BGS para el termistor, se tiene

$$V_o = U / [(A2/R) \exp[B2/(T+\theta)] + 1] \quad (9)$$

El parámetro A2 influye directamente sobre el valor R, en forma proporcional. Por esto; no será necesario tomarlo en cuenta en el cálculo de errores de alinealidad que sigue.

La Fig. 5 muestra una gráfica de  $V_o$  en función de T. Definimos como errores de temperatura a la diferencia de temperaturas entre la curva y la recta (segmento GH). Para minimizar estos errores se deben elegir el valor R y la recta que mejor se ajuste a la curva en el rango de temperatura usado.

Boel et al [11] proponen elegir como mejor recta a la tangente a la curva en el punto de inflexión (correspondiente a la temperatura  $T_o$ ). Esta elección producirá errores de temperatura de la forma mostrada en la Fig. 6, curva a. Dichos autores proponen elegir el valor R de forma que  $T_o$  esté en la mitad del rango de temperatura. Usando el modelo de BGS esta condición conduce a

$$R_f = A2 \exp[B2/(T_o+\theta)] [B2-2(T_o+\theta)]/[B2+2(T_o+\theta)] \quad (10)$$

donde  $R_f$  es el valor del resistor R calculado por este método.

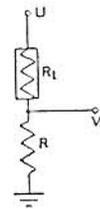


Figura 4

Circuito linealizador de termistores, de tipo resistivo.  
U: voltaje constante.  
 $V_o$ : voltaje de salida.

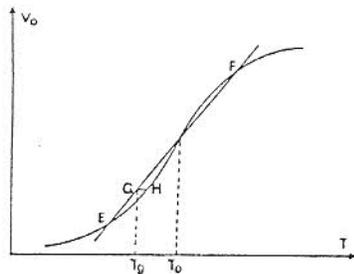


Figura 5

Curva típica del voltaje de salida  $V_o$ , en función de la temperatura  $T$  del termistor.  $T_o$  es la temperatura correspondiente al punto de inflexión. La recta representa la característica ideal del circuito linealizador. La diferencia entre las temperaturas dadas por la curva y la recta, es el error en temperatura (segmento GH).

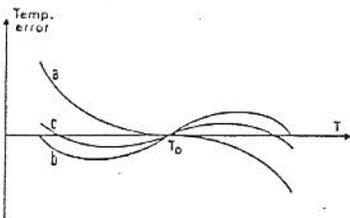


Figura 6

Errores en temperatura, según distintos métodos de diseño.  
 Curva a: recta tangente en el punto de inflexión.  
 Curva b: recta que une los puntos extremos.  
 Curva c: recta que pasa por  $T_o$  y tiene pendiente comprendida entre los casos a y b.

Otros autores [12] han propuesto elegir como mejor recta a la que une los puntos extremos de la curva. La curva de error será del tipo mostrado en la Fig. 6, curva b. Khan [13] menciona que se lograrían menores errores eligiendo como recta a una que pase por el punto de inflexión y tenga una pendiente ligeramente menor que la de la tangente. La forma de la curva de error sería del tipo mostrada en la Fig. 6, curva c. Sin embargo, no establece como elegir dicha pendiente.

En todos estos casos el valor de  $R$  surge de imponer que el punto de inflexión esté en el centro del intervalo de temperatura. Sin embargo, no existe ninguna razón teórica para suponer que ésta será la elección que logre el menor error. Más adelante mostraremos que otros criterios de elección conducen a menores errores.

La elección del mejor valor  $R$  y de la mejor recta necesita del uso de un método numérico, pues la determinación analítica de estos parámetros es muy engorrosa. Dichos valores dependen del rango de temperaturas y de los parámetros  $A_2$ ,  $B_2$  y  $\theta$ . Numéricamente se calculó el mejor valor del resistor  $R$  y la mejor recta linealizadora para una gran cantidad de casos. Se eligió como parámetro de calidad  $E_t$ , al máximo error absoluto en temperatura (diferencia en temperatura entre la recta y la curva). Se supuso que el termistor cumple exactamente la ecuación (2). Se varió la diferencia de temperaturas  $h$  ( $h = T_{\text{máxima}} - T_{\text{mínima}}$ ), del rango considerado, entre 50 K y 200 K, y los parámetros del termistor entre los siguientes valores:  $B_2$  entre 3000 K y 8000 K, y  $\theta$  en un rango de  $\pm 20\%$  a partir del valor dado por la ecuación (7).

Los máximos errores de temperatura hallados dependen de la diferencia de temperaturas  $h$ . Sin embargo, prácticamente no dependen de la ubicación del rango de temperaturas. La Fig. 7 muestra que para una diferencia  $h=150$  K, los errores son similares, al variar la ubicación del rango de temperaturas. En esa figura las abscisas representan la temperatura central  $T_c$  del rango [ $T_c = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2$ ] y las ordenadas los errores  $E_t$  calculados. Los círculos corresponden a un termistor

con  $B_2=3000$  K, las cruces a  $B_2=5000$  K y los triángulos a  $B_2=8000$  K.

La variación del valor de  $\theta$  en un rango  $\pm 20\%$  del valor central dado por (7), no influye significativamente en los valores de los errores. La Fig. 8 muestra la variación del error  $E_t$  versus la relación  $\theta/\theta_o$ , donde  $\theta_o$  es el valor dado por la ecuación (7). Fueron usados termistores con 3 diferentes valores de  $B_2$  (círculos:  $B_2=3000$  K, cruces:  $B_2=5000$  K, triángulos:  $B_2=8000$  K).  $E_t$  varía menos del 14% para todos los casos. El rango de temperaturas fue de  $0^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$  para todos los puntos.

En base a lo anterior y a los resultados del cálculo numérico, proponemos elegir el valor de  $R$  de acuerdo a la relación heurística:

$$R = k R_f \quad \text{donde} \quad k = 0.00313 h + 0.913$$

$k$  varía entre 1.07 para  $h=50$  K y 1.54 para  $h=200$  K. Como recta, proponemos elegir aquella que produce errores nulos en las temperaturas ubicadas al 6.9% y 89.5% de  $h$ , desde la temperatura inicial del rango considerado (por ejemplo, para el rango  $-10^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$  se impondrían errores nulos en  $-3.8^\circ\text{C}$  y  $70.6^\circ\text{C}$ ).

La Tabla I muestra una comparación entre los tres métodos mencionados. Notar que el error solo depende de  $B_2$  y  $h$ . La influencia del valor de  $\theta$  y de la ubicación del rango, son despreciables, tal como se mostró anteriormente. Por esto, todos los intervalos de temperatura comienzan en  $0^\circ\text{C}$ . El método propuesto (columna 6) logra errores alrededor de 3 veces menores que el método propuesto por Boel (columna 4), y 1.6 veces menores que los errores del método de Beakley (columna 5). Por otro lado, los errores promedio producidos por el método propuesto son sólo 1.09 mayores que los errores generados calculando numéricamente los mejores parámetros (columna 7).

$B_2$ (K)	RANGO (K)	$h$ (K)	Método 1 (Boel) $E_t$ (K)	Método 2 (Beakley) $E_t$ (K)	Método 3 (Propuesto) $E_t$ (K)	Método numérico $E_t$ (K)
3000	273 - 323	50	1.3	0.6	0.4	0.3
3000	273 - 373	100	7.5	4.2	2.5	2.3
3000	273 - 423	150	17.8	10.6	6.3	5.9
3000	273 - 473	200	29.2	19.4	12.3	9.9
5000	273 - 323	50	2.2	1.0	0.6	0.6
5000	273 - 373	100	11.9	6.3	3.6	3.6
5000	273 - 423	150	28.8	15.7	9.3	8.5
5000	273 - 473	200	51.6	26.8	17.5	16.1
8000	273 - 323	50	3.0	1.4	0.9	0.9
8000	273 - 373	100	16.4	8.2	4.8	4.8
8000	273 - 423	150	38.9	20.3	12.2	11.0
8000	273 - 473	200	68.1	35.4	22.7	20.8

TABLA I

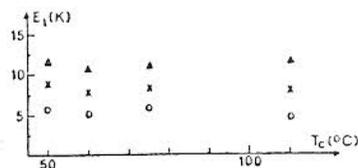


Figura 7

Relación entre la temperatura central del rango usado ( $T_c$ ) y el error  $E_t$ . La diferencia de temperaturas  $h$  es 150 K para todos los puntos.

Círculos:  $B_2 = 3000$  K  
 Cruces:  $B_2 = 5000$  K  
 Triángulos:  $B_2 = 8000$  K

El valor de  $\theta$  es el dado por la ecuación (7).

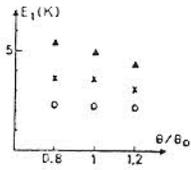


Figura 8

Relación entre el cociente  $B/B_0$  y el error  $E_1$ .

#### 4. CIRCUITOS LINEALIZADORES ELECTRONICOS

Muchos circuitos electrónicos han sido propuestos. En todos los casos se usó el modelo exponencial para representar al termistor.

Patranabis et al [14] proponen usar un circuito activo incluyendo un amplificador logarítmico, logrando errores de alrededor de 1 K en un rango de 30°C a 95°C. En ese trabajo no se presenta el valor de  $B_1$  del termistor usado. Con un circuito resistivo diseñado con el modelo BGS, los errores estarían entre 1 K y 2 K, según el termistor usado (ver Tabla I). Esto muestra que un resistor lograría errores similares a un complicado circuito activo, lo cual pone en duda la utilidad de ese circuito.

Alon et al [15] proponen un circuito activo que tiene errores de 0.8 K en un rango de 0°C a 50°C. Ellos no detallan el termistor usado, pero aún con  $B_2=8000$  K ( $B_1=4830$  K) se obtendría un error de 0.9 K si se usara un circuito resistivo, diseñado con el método propuesto. Por lo tanto, este circuito activo no

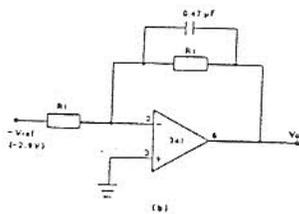
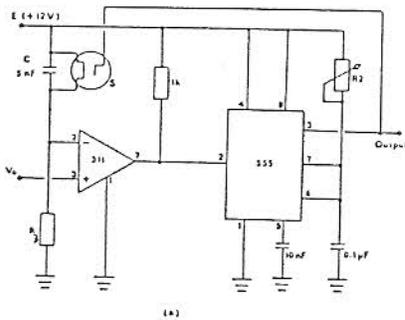


Figura 9

Circuito linealizador propuesto por Sundqvist.  
(a) Convertidor voltaje/frecuencia.  
(b) Convertidor resistencia/voltaje.

presenta utilidad alguna.

Sengupta [5] ha propuesto un circuito conversor temperatura/frecuencia. En sus resultados experimentales aparecen errores de 0.7 K en un rango de 50°C a 85°C. El termistor tenía  $B_1=3400$  K, que corresponde a  $B_2=4600$  K. De la Tabla I se concluye que un circuito resistivo tendría errores de 2 K aproximadamente. La diferencia de errores no parece justificar el empleo de ese circuito activo, en el rango de temperaturas mencionado.

Un método electrónico muy usado para linealización, consiste en el uso de osciladores que presenten una transferencia logarítmica entre el voltaje de entrada y el período  $t$  de la onda de salida. En la Fig. 9a se reproduce el circuito propuesto en la referencia [8]. El FET S está controlado por el monostable. En ese trabajo se muestra que la transferencia vale:

$$t = R_3 C \ln(E/V_0) + t_m \quad (11)$$

donde  $E$  es un voltaje fijo,  $V_0$  el voltaje de entrada y  $t_m$  es el tiempo fijo del pulso generado por el monostable.

Mediante el circuito de la Fig. 9b se obtiene  $V_0=K/R_t$ , donde  $K=V_{ref} R_1$ , y  $R_t$  es la resistencia del termistor. Por lo tanto

$$t = R_3 C \ln(E R_t/K) + t_m \quad (12)$$

En ese trabajo se sustituye  $R_t$  por el valor del modelo exponencial y se obtiene

$$t = R_3 C B_1/T + R_3 C \ln(E A_1/K) + t_m \quad (13)$$

El valor de  $E A_1/K$  es menor que 1, por lo cual el logaritmo es negativo. Elijiendo

$$t_m = -R_3 C \ln(E A_1/K) \quad (14)$$

se obtiene  $t = R_3 C B_1/T$ , o sea

$$f = T/(R_3 C B_1) \quad (15)$$

donde  $f=1/t$ . Esto muestra que teóricamente la linealización del circuito propuesto es perfecta. Sin embargo en los resultados experimentales publicados en ese trabajo aparecen errores de 2°C en un rango comprendido entre 0°C y 100°C. Los puntos indicados por círculos en la Fig. 10 reproducen la curva de error publicada. Es interesante notar que esta curva es similar a la de la Fig. 1. Esto corrobora el hecho que los errores de este circuito son debidos a los errores del modelo.

Usando el modelo BGS mostrado en (2) y la ecuación (12) se obtiene

$$t = R_3 C B_2/(T+\theta) + R_3 C \ln(E A_2/K) + t_m \quad (16)$$

Elijiendo

$$t_m = -R_3 C \ln(E A_2/K) \quad (17)$$

se tiene

$$f = (T+\theta)/(R_3 C B_2) \quad (18)$$

La frecuencia sigue dependiendo en forma lineal de la temperatura, aunque en este caso a temperatura cero corresponde una frecuencia distinta de cero.

#### 5. EVALUACION EXPERIMENTAL

Se armó el circuito mostrado en la Fig. 9 usando un termistor Philips 2322 640, con lo cual se reproduce

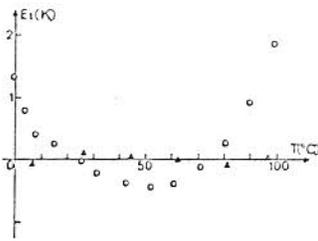


Figura 10

Errores del circuito linealizador mostrado en la Fig. 9.  
Los círculos corresponden al uso del modelo exponencial.  
Los triángulos corresponden al modelo BGS.

el circuito propuesto por Sundqvist. Solo se cambiaron los valores de los resistores R3, R1 y R2 de manera que se cumpla la ecuación (16). Los valores propuestos eran R3=4.8 kΩ, R1=2.4 kΩ y R2=2.5 kΩ. Los nuevos son R3=3.5 kΩ, R1=1.5 kΩ y R2=1.7 kΩ. Hubiera sido suficiente cambiar solo el valor de R2, pero se hubiera alterado el rango de medida. Los valores de R3 y R1 se cambiaron para conservar el rango de medida entre 0°C y 100°C.

Los parámetros del termistor A2, B2 y θ fueron determinados de forma de lograr el mejor ajuste entre los puntos R-T medidos y los calculados con el modelo BGS. El rango de temperaturas fue de 0°C a 100°C. Los valores obtenidos son: A2=6.691 mΩ, B2=5118 K y θ=56.95 K. Los valores de los dos parámetros correspondientes al modelo exponencial son A1=46.02 mΩ, B1=3725 K. Para el ajuste del circuito se usó un único potenciómetro en R2 de manera de poder ajustar tm al valor calculado. El objetivo del ensayo de este circuito es demostrar que se puede lograr una muy buena linealidad, por lo cual no interesa ajustar exactamente el valor de la pendiente.

La frecuencia de salida se midió con un frecuencímetro con errores menores a 4 ppm, mientras que para la medición de temperatura se usó un baño controlado con errores menores a 0.03°C. La Tabla II muestra las mediciones realizadas. Se calculó la recta que mejor se ajusta a esos puntos. La Fig. 10 muestra con triángulos, los errores. De la comparación con los errores publicados por Sundqvist surge que con el ajuste del circuito propuesto, el error máximo disminuye 20 veces. El máximo error en el circuito original era de 1.8°C, mientras que con el propuesto es de 0.09°C.

T (°C)	f (Hz)	Et (K)
6.59	3776.34	-0.08
25.72	4016.04	0.09
44.28	4245.91	0.04
62.15	4467.22	0.00
80.87	4698.68	-0.08
96.62	4895.63	0.03

TABLA II

## 6. CONCLUSIONES

El modelo exponencial para la representación de termistores no es suficientemente preciso para usarse en circuitos linealizadores. Los errores producidos por esta representación matemática son mayores que 1°C en un rango de 0°C a 100°C. Esto enmascara las bondades de los circuitos linealizadores. Prueba de ello es que varios complejos circuitos linealizadores propuestos

recientemente logran resultados similares a los producidos por un solo resistor.

Proponemos usar el modelo BGS el cual es ligeramente más complicado que el exponencial, pero presenta errores entre 10 y 20 veces menores.

Una corroboración experimental soporta las conclusiones teóricas. Se logró reducir 20 veces el error en linealidad de un circuito publicado, simplemente cambiando los valores de algunos resistores. Para calcular los nuevos valores se modificaron las ecuaciones de diseño, cambiando el modelo exponencial del termistor por el de BGS.

## 7. REFERENCIAS

- [1] J.S. Steinhart y S.R. Hart, "Calibration curves for thermistors," Deep-Sea Research, Vol 15, pp 497-503, 1968.
- [2] J. A. Becker, C.B. Green y G.L. Pearson, "Properties and uses of thermistors," AIEE, Vol 65, pp 711-725, 1946.
- [3] G. Bosson, F. Gutmann y L.M. Simmons, "A relationship between resistance and temperature of thermistors," Journal of Applied Physics, Vol 21 pp 1267-1268, 1950.
- [4] R.H. Cordella Jr, "A heuristic thermistor model," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol CAS-29, pp 272-276, 1982.
- [5] R.N. Sengupta, "A widely linear temperature to frequency converter using a thermistor in a pulse generator," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol IM-37, pp. 62-65, 1988.
- [6] A.A. Khan, "An improved linear temperature/voltage converter using thermistor in logarithmic network," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol IM-34, pp.635-638, 1985.
- [7] M. Ikeuchi and T. Furukawa and G. Matsumoto, "A linear temperature-to-frequency converter," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. IM-24, pp. 233-235, 1975.
- [8] B. Sundqvist, "Simple, wide-range, linear temperature-to-frequency converters using standard thermistor," J. Phys. E, Vol. 16, pp. 261-264, 1983.
- [9] D. Slomovitz, "The temperature/resistance curve of NTC thermistors," Test and Measurement World, Vol. 7(5), pp. 73-79, 1987.
- [10] H.J. Hoge, Rev. Sci. Instrum, Vol. 50(3), pp. 316-20, 1979.
- [11] M. Boel, B. Erickson, Rev. Sci Instrum., Vol. 36, pp. 904-8, 1965.
- [12] W.R. Beakley, J. Sci. Instrum., Vol. 28, pp. 176-9, 1951.
- [13] A.A. Khan, Int. J. Electron., Vol. 59, pp. 129-39, 1985.
- [14] D. Patranabis, S. Ghosh, C. Bakshic, IEEE Inst. and Measur., Vol. 37, pp. 66-9, 1988.
- [15] Y. Alon, M. Jonas, Rev. Sci. Instrum., Vol. 40, pp. 646-7, 1969.